

文章编号: 0455-2059(2015)02-0193-09

地基 12 通道微波辐射计反演大气温湿廓线及估算 雷达路径积分衰减

张北斗¹, 黄建平¹, 郭 杨², 商 建², 吴 琼²

1. 兰州大学 大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000
2. 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘 要: 利用 TP/WVP-3000 型地基微波辐射计 12 通道亮温观测资料, 发展了一套大气温湿及液态水廓线反演算法. 首先对近 20 年历史探空数据进行数据转换、插值等处理后, 分无云和有云两种类型, 运用 MWMOD 微波辐射传输模式, 计算无云情况下的微波亮温集, 根据相对湿度廓线, 利用模式的绝热液水含量分析方法, 模拟计算出液态水廓线及对应的微波亮温数据集, 利用改进 BP 神经网络计算模型, 通过神经网络学习训练, 获取代表该地区的神经网络系数, 用于反演计算大气温度、水汽密度、相对湿度和液态水廓线. 与 GPS 探空数据对比, 反演的大气温度廓线在 7 km 以下误差均在 3 K 以内, 水汽密度廓线在 6 km 以下误差均在 3 g/m² 以内, 部分底层廓线的反演值与 GPS 探空观测接近, 获得了较好的反演结果. 同时, 通过模式分析出云水廓线, 弥补 GPS 探空不足, 利用微波辐射计观测进行验证, 估算雷达路径积分衰减, 用于试验降水雷达反演分析.

关键词: 微波辐射计; 降水雷达; 温湿廓线; 水汽

中图分类号: P412

文献标识码: A

DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2015.02.008

Retrieval of atmospheric temperature, humidity profile and attenuation estimation using a twelve channel ground-based microwave radiometer

Zhang Bei-dou¹, Huang Jian-ping¹, Guo Yang², Shang Jian², Wu Qiong²

1. School of Atmospheric Sciences, Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change with the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China
2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: An atmospheric profile retrieval algorithm was proposed based on the MWMOD microwave radiation transmission model and neural network using a twelve channel microwave radiometer. Temperature profile, water vapor profile, relative humidity profile, liquid water profile, integrated water vapor and liquid water path were retrieved through an analysis of the observed microwave radiation brightness and temperature, which are very important for an airborne field campaign. The error of the inversion temperature profile was lower than 3 K in the 7 km, and the one of humidity profiles was lower 3 g/m² in the 6 km. The inversion results were better in some cases. The path-integrated attenuation (PIA) of the ground-base radar could be computed by analyzing the liquid water content of cloud, and could be validated using the observation of TP/WVP-3000 Radiometer. Using a ground-based multi-channel microwave radiometer, GPS radiosonde data and MWMOD model, the integrated attenuation of the Ka-band radar was computed and the attenuation correction was accomplished. The retrieval data has important reference value for estimating the attenuation of ground-based weather radar echoes.

Key words: microwave radiometer; precipitation radar; temperature and humidity profile; water vapor

收稿日期: 2014-06-16; 修回日期: 2014-09-22

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2012CB955301); 国家自然科学基金项目(41305027, 41201360); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LZUJBKY-2015-7)

作者简介: 张北斗(1980-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 工程师, e-mail: beidou@lzu.edu.cn, 研究方向为大气微波遥感.

大气微波遥感的理论研究工作始于20世纪40年代. 文献[1-2]研究了水汽和氧气的微波吸收特性, 从理论上确定了大气水汽分子和氧气分子的微波吸收带, 并对吸收系数做了计算, 为大气微波辐射理论的研究奠定了基础. Westwater^[3-4]自1969年开始研究地基的微波遥感方法, 研制出K波段和V波段微波辐射计, 并利用统计法、线性回归法等方法反演大气的温度、水汽含量和液态水含量. 中国的微波辐射计研究工作始于20世纪70年代, 北京大学赵柏林等^[5-6]研制出中国第一台5 mm频段地基微波辐射计, 并用于遥感大气温度层结试验, 利用扫角法迭代反演获得温度层结. 吕达仁等^[7]研制出3.2 cm频段非平衡式Dicke地基测雨微波辐射计, 进行遥感大气湿度和区域降雨量. 随后, 微波辐射计开始应用于各类观测试验, 为数值预报、气候变化研究提供精细大气参数和变化特征, 并与激光雷达、风廓线雷达、云雷达、梯度观测塔及卫星观测等资料相互结合补充, 进行大气温度、水汽、云中液态水含量、过冷水云等基本气象探测和云的微物理特性研究, 观测资料广泛应用于数值预报、灾害预警、边界层遥感、航空气象、气候变化研究、人工影响天气工程等^[8-17].

中国疆域辽阔, 气象灾害多发. 为减少灾害性天气对工农业生产和国民经济造成的巨大威胁, 国家不断加强现代化气象观测手段, 增强人工影响天气的能力. 地基多通道微波辐射计采用被动接收的方式, 工作时无需对外发射电磁波, 体积小、功耗低, 还有长期连续工作、无人值守和便于组网等独特优势, 它不仅能探测垂直路径上的水汽和液态水总量信息, 更可贵的是能够连续、高分辨率探测大气温湿廓线, 同时结合红外测温仪, 进行液态水廓线探测. 因此, 地基多通道微波辐射计的研究具有非常重要的科学意义及社会效益; 另一方面, 微波辐射计特有的隐蔽探空能力在军事应用方面也大有可为.

国外研制的地基微波辐射计与风廓线雷达结合, 已逐渐代替探空气球, 与各种天气雷达互为补充, 连续不间断地组网观测, 为数值预报、气候变化研究提供长期连续观测资料. 美国和欧盟经过几十年持续研究和应用实践, 已经开发出基于各种平台、结构合理、高精度、高稳定、探测功能强大的多通道微波辐射计, 使得包括星载、机载以及地基等各种平台的微波辐射计各展所长、协同工作. 目前国外的微波辐射计技术已发展相对成熟, 现在正向着多通道、高频和网络化方向发展.

中国多通道微波辐射计的研制工作也在逐渐展开^[18-19].

2010年, 国家卫星气象中心联合兰州大学、航天科工集团第二研究院、中国气象科学研究院等多家单位, 在天津渤海湾和江苏黄海区域开展了中国首次星载降水雷达机载校飞试验. 本文发展了基于MWMOD(Microwave radioactive transfer model)微波辐射模式和神经网络的大气廓线反演算法, 用于试验的大气温湿廓线、积分水汽及云水含量的反演, 并利用GPS探空数据和微波辐射计观测亮温估算雷达路径积分衰减, 反演数据对于星载雷达校飞试验观测对比、机载雷达性能评估分析、雷达定标及反演算法研究具有重要的应用价值.

1 中国星载降水测量雷达校飞试验简介

降水的测量和云水的时空分布变化特征对于数值天气预报、气候变化研究及人工影响天气工程等具有重要的意义. 星载降水测量雷达是风云三号(FY-3)02批卫星观测中的重要仪器, 该仪器的两个原理样机(Ka和Ku频段雷达)在国防科工局“十一五”预研项目支持下研制成功. 中国气象局国家卫星气象中心联合兰州大学等多家单位开展了机载降水测量雷达校飞试验, 原理如图1所示. 试验分两期进行, 第1期于2010年6-7月在天津渤海湾开展了Ka频段星载降水测量雷达机载校飞试验(BH-RM 2010), 第2期于2010年9-10月在江苏东台开展了Ku/Ka双频星载降水测量雷达机载校飞试验(JS-RM 2010). 主要观测仪器设备有: 地基12通道微波辐射计、车载X波段多普勒雷达、地基多普勒天气雷达、10 GHz和37 GHz辐射计、便携式风速测量仪、GPS探空气球、测温仪

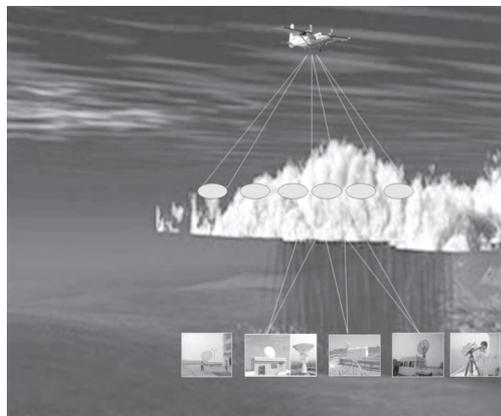


图1 星载降雨雷达的机载校飞试验原理图

Figure 1 Schematic diagram of calibration for flight precipitation radar

等^[20]。试验目的是验证Ku/Ka降水测量雷达的各项功能和性能指标,同时利用地面雷达和微波辐射计进行同步观测,进行降水测量雷达观测资料对比、单/双频降雨数据处理和反演算法研究等。

2 TP/WVP-3000型微波辐射计

TP/WVP-3000是一种新型的12通道地基微波辐射计,在天气预报、气候变化等领域开展广泛观测,外部构造及内部结构见图2。该辐射计在水汽敏感的K波段(20~30 GHz)设置了5个通道,分别为22.235, 23.035, 23.835, 26.235, 30.00 GHz,在温度敏感的V波段(50~60 GHz)设置了7个通道,分别为51.25, 52.28, 53.85, 54.94, 56.66, 57.29, 58.80 GHz,能够直接测量这12个通道的微波辐射亮温。该辐射计还带有测量温度、湿度和气压的地面气象传感器,并且使用了对准天顶的红外温度计测量云底温度,频段为9.6~11.5 μm 。利用辐射计的反演软件可以连续反演获得从地表至10 km的温度、水汽密度以及液态水的垂直廓线,0~1 km分辨率为100 m,1~10 km分辨率为250 m,共计47层数据。

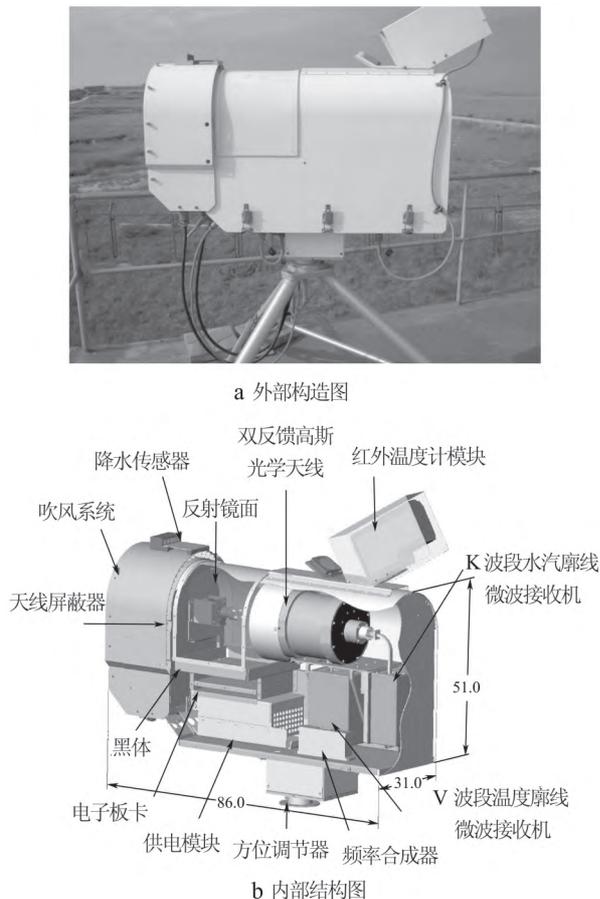


图2 TP/WVP-3000型地基微波辐射计

Figure 2 TP/WVP-3000 ground-based microwave radiometer

兰州大学自2006年引进TP/WVP-3000型多通道地基微波辐射计以来,除在兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)进行常规观测外^[21],还参加了2006年民乐祁连山观测试验、2010年中国星载降水雷达机载校飞试验、2012年MWP967KV型地基多通道微波辐射计对比观测试验、2013年山西忻州气溶胶与云相互作用观测试验、2014年中国气象局气象探测中心机载W波段云雷达探测试验等多项观测试验,观测数据用于各类分析对比研究中。

本次校飞试验期间,TP/WVP-3000型微波辐射计位于天津渤海湾(38.85° N, 117.50° E),对微波辐射计扫描方式进行设置,分30°, 60°, 90°, 120°, 150°多角度扫描观测,观测时间为2010年6-7月。本文使用的GPS探空资料的起始位置为38.25° N, 117.62° E,观测的典型时次有7月2日10:12、7月9日9:58、7月10日9:58、7月20日10:05。

3 12通道地基微波辐射计大气廓线反演算法

由观测亮温反演获得大气温湿廓线参数的几种代表性的方法有经验正交函数法、逐步回归法、迭代法、神经网络法等,对这些方法有很多研究成果^[3-17, 22-23]。经验正交函数法原理是通过构造出经验正交函数,获得对大气廓线的最佳拟合;逐步回归法是从一组亮度温度回归大气层结,进行逐步回归计算,通过筛选得到最优的指标组成回归方程;迭代法利用反复迭代计算,当 $|Tb(n+1) - Tb(n)| < \delta$ 时收敛,此时为反演最佳结果;神经网络法是通过大量样本的多次学习和训练,获得一组最佳神经网络系数,融合了该区域廓线的反演信息。经验正交函数法、逐步回归法、迭代法实现简单,缺点是运算速度慢;神经网络方法具有很好的非线性处理能力,在先期进行大量的学习训练,反演时可以实现快速计算,具有很好的实时性,缺点是需要反演地区的历史探空资料作为基础,应用的范围受到限制。

Radiometrics公司为购买方开发一套神经网络反演软件用于本地区的大气廓线反演。若购买方不能提供该地区多年的探空数据,则采用全球相似地区的探空资料。由于对兰州大学购买的TP/WVP-3000型微波辐射计只提供针对兰州地区的神经网络文件,而对于天津滨海试验和江苏东台试验等观测地区,微波辐射计能够观测获得精确的亮温数据,但无法进一步获得所需要的准

确的大气廓线,必须针对试验所在观测区域,开发一套微波辐射计大气温湿廓线及积分水汽和液态水的反演算法,用于微波辐射计的反演工作。

本文的算法流程如下:

1) 以试验地区近20年的历史无线探空资料为样本集,经过先期去除资料数据量缺失、格式转换、插值等处理后,进行分类处理,分为大气晴空无云数据集和有云数据集两种状况。

2) 对于晴空无云的样本集,利用大气微波辐射传输模式,以晴空大气温度、湿度、气压、高度等信息作为输入参数,计算获得多通道微波辐射亮温数据集、积分水汽总量和液态水总量,其中液态水总量值为零。地基遥感大气微波辐射传输方程为

$$T_b(\theta, \nu) = T_\infty e^{-\int_0^\infty \alpha \sec \theta dz} + \int_0^\infty T(z) \alpha \sec \theta e^{-\int_0^z \alpha \sec \theta dz} dz. \quad (1)$$

其中, T_∞ 是太空辐射亮度温度, θ 是天顶角, ν 是频率, $T(z)$ 是大气温度, z 是高度, α 是吸收系数, $\alpha = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{Cl}}$ 分别为水汽分子、氧分子和云中液态水的吸收系数。

3) 对有云样本数据集,以大气相对湿度廓线作为初始数据,使用绝热液水含量分析方法,模拟计算出液态水廓线。液态水分析方法如下:

首先设定一个相对湿度的阈值(本文取RH为90%),探空数据中若相对湿度大于这一阈值,表明该层有云(液态水)出现。每层云中绝热液态水含量为^[24-25]

$$C_{\text{LW_ad}}(h) = \int_{z_0}^h \rho(z) \frac{c_p}{L} (\Gamma_d - \Gamma_s) dz. \quad (2)$$

其中, z_0 为云底高度(m), $\rho(z)$ 为空气密度(kg/m^3), c_p 为空气定压比热($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), L 为汽化潜热(J/kg), Γ_d , Γ_s 分别为干绝热递减率和湿绝热递减率(K/m), $C_{\text{LW_ad}}$ 为每层液态水含量的上限值(kg/m^3)。考虑到夹卷、降水和凝结作用,对 $C_{\text{LW_ad}}$ 进行修正后得到每一层实际的云中液态水含量为

$$C_{\text{LW}} = C_{\text{LW_ad}}(1.239 - 0.145 \ln \Delta h). \quad (3)$$

其中, Δh 为与云底的高度差(m), C_{LW} 是修正后的云中液态水含量(kg/m^3)。

4) 将晴空无云模式计算获得的亮温数据集和有云状况计算获得的亮温数据集,与大气廓线一一对应,合并成综合数据集。为增加对噪声信号的抗干扰能力,对亮温数据集进行添加随机噪声处理,方程为

$$BT = BT_0 + \beta \cdot \text{RAND}(N). \quad (4)$$

$\text{RAND}(N)$ 为随机数产生函数,生成 $-1 \sim 1$ 之间的一个随机数, β 调节取值权重大小(本文取 $\beta = 1.5$)。

5) 将模拟的微波辐射亮温值归一化后作为输入参数,以对应的大气温湿廓线及第一层大气温度、湿度、气压作为输出样本,构造改进型BP神经网络训练样本集,在高性能计算中心平台上,经过百万次循环神经网络训练,获得一组能够代表试验区大气廓线的神经网络参数。

6) 以TP/WVP-3000型地基微波辐射计的仪器观测亮温和实测的地表温度、湿度、气压作为参数,输入至神经网络模型,计算出47层大气温度、水汽、相对湿度、液态水廓线及大气整层的积分水汽和液态水总量。

4 反演数据对比与分析

以上述发展的12通道地基微波辐射计反演算法,对试验期间(2010年6-7月、9-10月)的微波辐射计观测亮温重新反演计算处理。为了能做出精确的对比分析,本文选取试验期间,实施了GPS探空观测的两个代表性时间(7月10日9:58和7月20日10:05),对反演获得的大气温度、水汽密度、相对湿度、液态水廓线和GPS探空做对比分析。GPS探空的起始位置为 38.25°N , 117.62°E ,与TP/WVP-3000微波辐射计距离30m以内。探空数据中有地面至近30km高度内的大气气压、温度、相对湿度、位势高度、风向风速、露点温度等信息,近2500多层探空数据,每2s自动观测一次。为了与微波辐射计反演数据做对比分析,本文从中抽取了47个相同高度的大气温度、相对湿度的廓线信息,计算相对应的水汽密度廓线。

如图3所示,微波辐射计观测亮温反演的大气廓线与GPS探空数据对比:7月10日9:58反演对比,反演的大气温度廓线在7km以下误差均在3K以内,水汽密度廓线在6km以下误差均在 $3\text{g}/\text{m}^2$ 以内,底层部分与GPS探空观测接近,误差很小。

如图4所示,7月20日10:05反演结果,在1km以下的温度廓线有最大3K的误差,在1~10km反演效果非常理想,误差很小,接近探空观测值;水汽密度廓线在5km以下几乎与GPS探空的观测值相等,误差在 $0.5\text{g}/\text{m}^2$ 以内。反演的部分廓线精度优于文献[10]的反演结果。

本文算法反演的相对湿度廓线是由水汽密度廓线和温度廓线计算获得,从图3,4中看出,6km以下较好地拟合了廓线的趋势,6km以上偏差稍大,这是由于温度廓线和水汽廓线两个误差共同

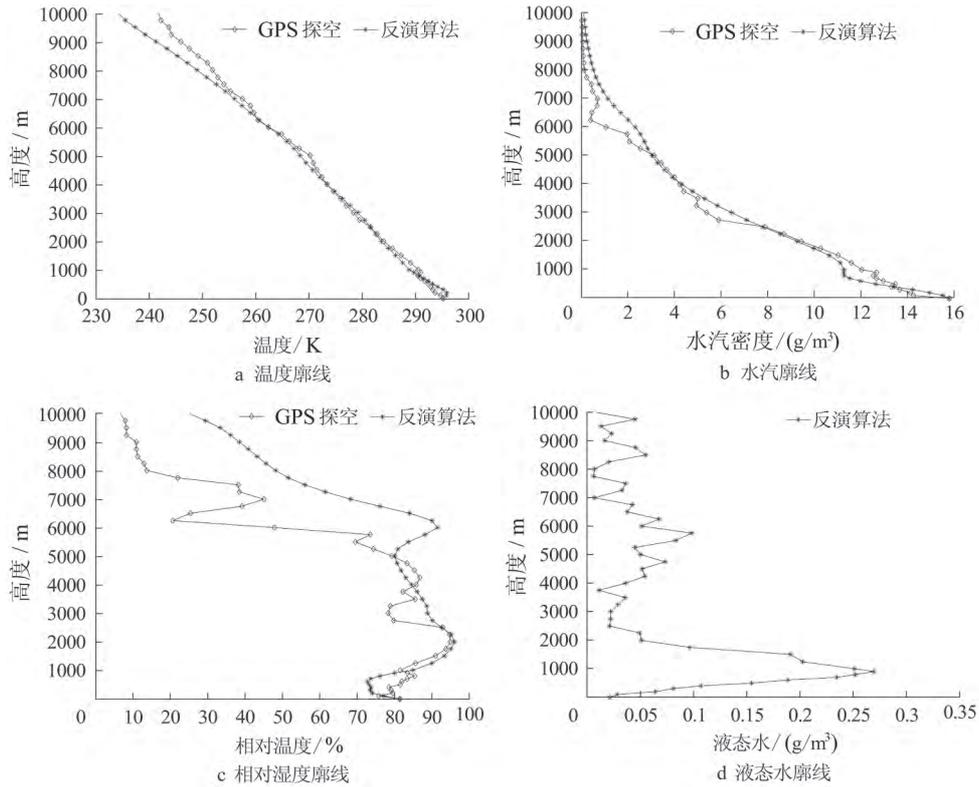


图3 微波辐射计亮温反演大气廓线与GPS探空数据对比(7月10日)

Figure 3 Comparison of radiometer retrievals and GPS radiosonde (July 10)

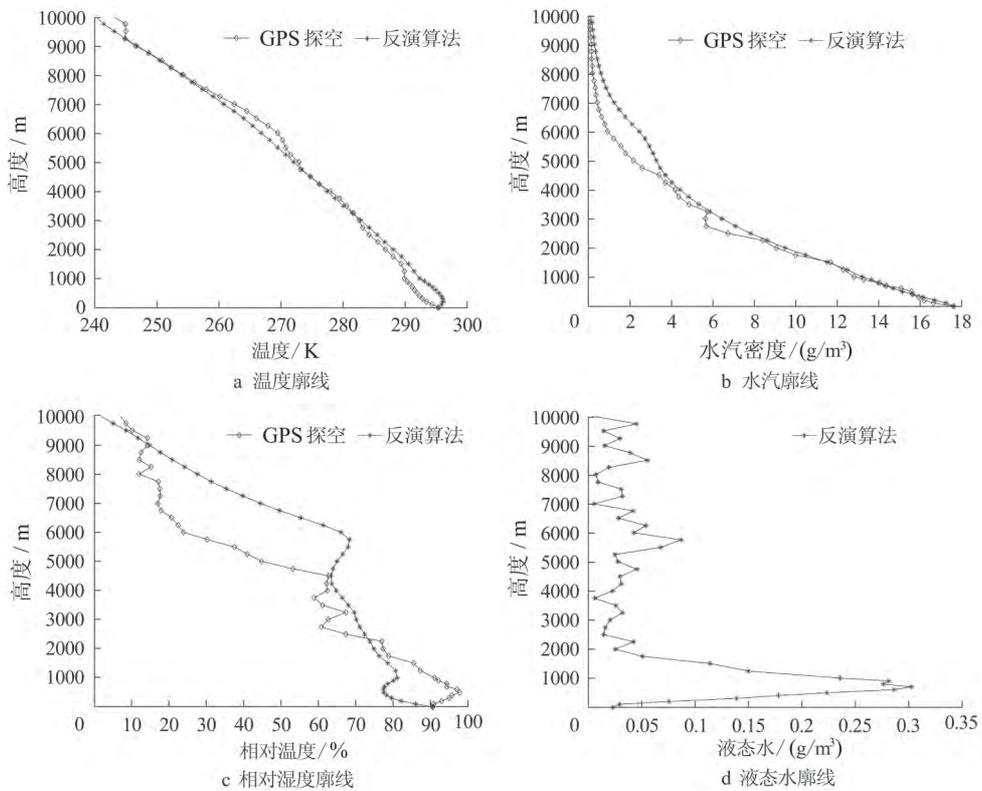


图4 微波辐射计亮温反演大气廓线与GPS探空数据对比(7月20日)

Figure 4 Comparison of radiometer retrievals and GPS radiosonde (July 20)

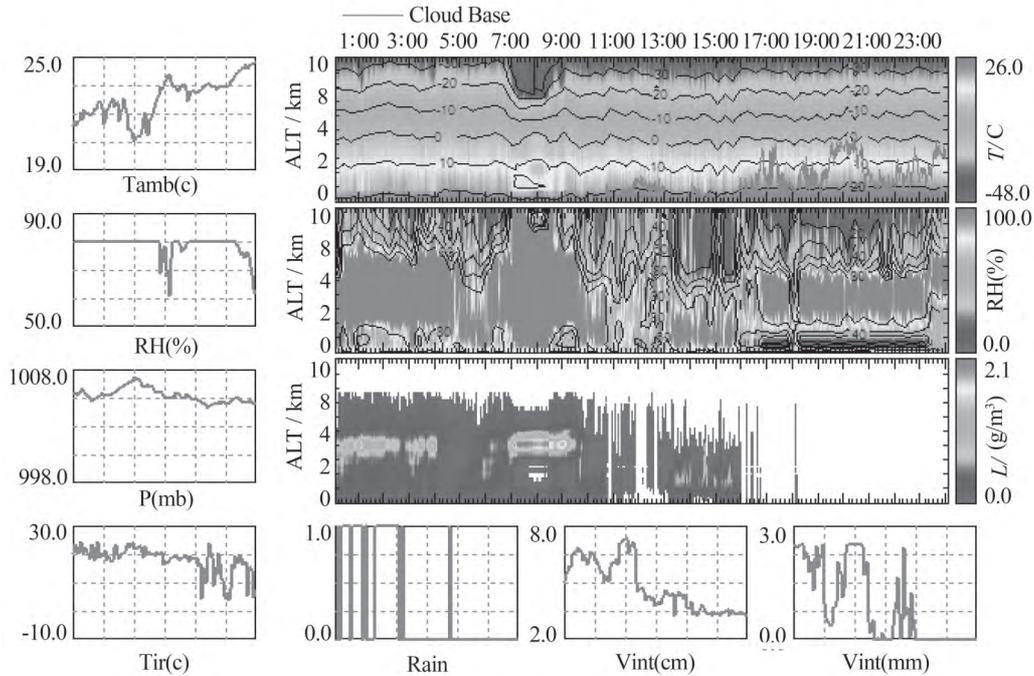
作用, 相乘放大的结果. 若水汽廓线和温度廓线均有5%的相对误差, 则相对湿度廓线会出现25%的

误差. 由于水汽廓线在高空处数值小, 即便有较小的误差, 计算获得的相对湿度廓线也会出现较大

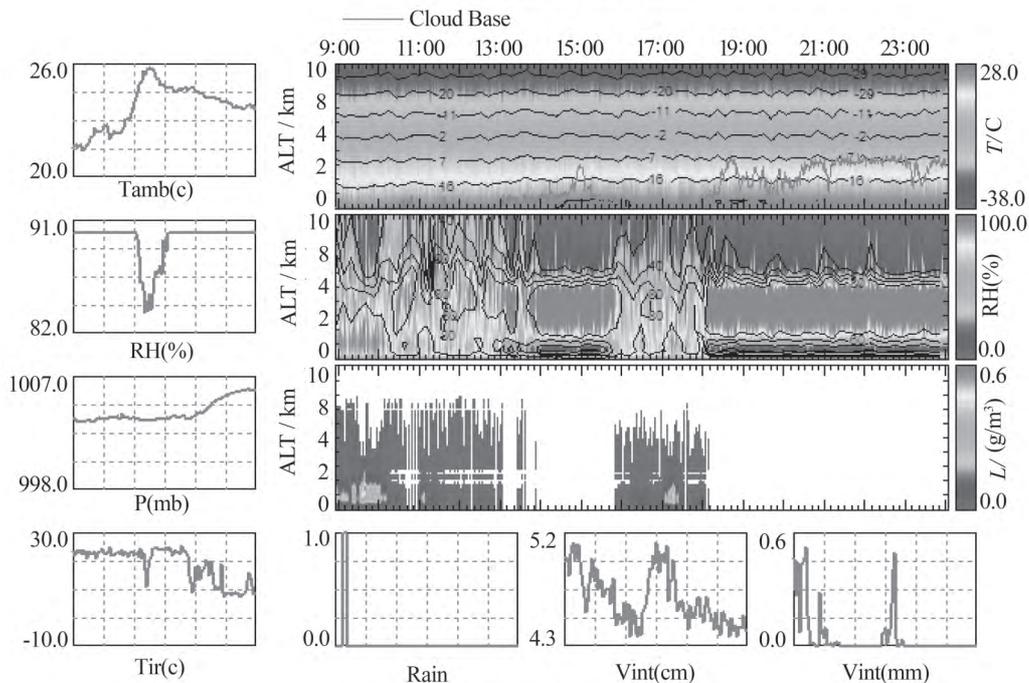
偏差,这正是相对湿度廓线反演精度有待提高的困难之处.同时给出了反演的液态水廓线.

利用反演算法对试验期间所有观测亮温进行反演计算,仍选取7月10日和20日校飞试验过程期间的数据分析. GPS探空仅能够给出一条廓线,无法给予长时间连续观测数据,微波辐射计具有自动观测、反演、存储的功能,实时反演提供大气

温度、水汽、相对湿度及液态水廓线数据,为试验的顺利开展提供了丰富的观测资料.对于7月10日,从图5中分析看出,在7:00-9:00期间,出现一次降水过程,降水到来后,高层大气温度降低,相对湿度值增高,反演云水廓线极大值在2.1 g/m³,积分水汽和积分液态水含量都较大,分别达到了7.5 cm和2.8 mm,为试验提供了准确的观测数据.



a 试验7月10日廓线时间剖面图



b 试验7月20日廓线时间剖面图

图5 典型校飞试验期间温湿廓线连续剖面图

Figure 5 Time sequences of atmospheric profiles in flight experiment

5 地基多通道微波辐射计用于估算雷达路径积分衰减

雷达的衰减订正在降水雷达的反演算法研究中具有重要的作用^[26]. 常用的衰减订正方法是结合HB(Hitschfeld-Bordan)和SRT(Surface reference technique)两种方法使用. 在本次星载雷达校飞试验中,因观测空间和时间段的限制,难以使用SRT方法对路径积分衰减进行订正. 为此提出了利用地基多通道微波辐射计观测亮温和试验地点的GPS探空数据,并结合MWMOD微波辐射传输模式模拟估算雷达路径积分衰减(PIA). 将GPS探空数据作为输入参数,通过设置相对湿度阈值,分析出GPS探空数据中无法观测到的液态水廓线. 同时,利用该模式模拟计算出有云情况下,与微波辐射计相同观测频段的12通道下行辐射亮温. 模拟亮温和TP/WVP-3000微波辐射计观测亮温的对比验证,进行云分析之后的模拟亮温值更加接近于实际观测值,分析获得的云水廓线相对精确,可以用于后续计算中,弥补了GPS探空的不足. 之后,利用辐射传输模式和上述分析出的液态水廓线,计算出有云情况下的大气整层透过率,进而计算得到路径积分衰减(Path integrated attenuation, PIA),为雷达反射率因子的衰减订正提供一种有效手段^[25],为后续分析降水雷达的探测能力奠定了观测基础.

12通道地基多通道微波辐射计观测亮温与云分析前后模拟亮温的对比如表1所示. 在加入云水廓线后,模拟的亮温更接近于微波辐射计实际观测值.

表1 12个通道的模拟亮温与观测亮温值

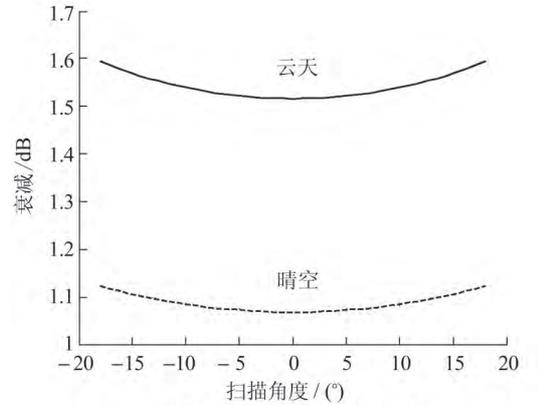
Table 1 12 channels simulated and observed brightness temperature

频点/GHz	模拟亮温/K		观测亮温/K
	云分析前	云分析后	
22.235	79.28	83.85	87.59
23.035	76.25	81.22	84.26
23.835	66.37	71.93	72.44
26.235	43.05	50.44	52.74
30.000	33.80	43.70	42.43
51.250	125.91	142.54	142.84
52.280	166.74	179.59	179.91
53.850	261.40	264.38	262.21
54.940	287.66	287.91	285.28
56.660	292.23	292.23	291.11
57.290	292.65	292.66	291.56
58.800	293.07	293.07	293.94

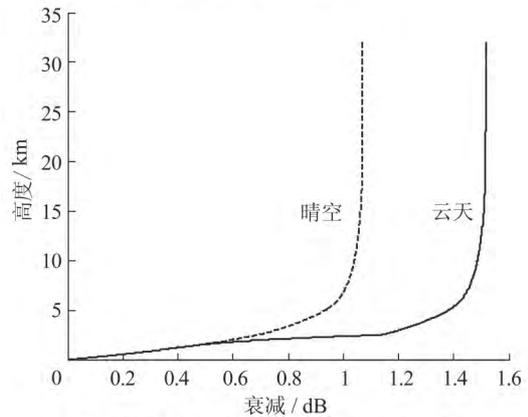
$$PIA = 10 \lg\left(\frac{1}{e^{-2\tau}}\right). \quad (5)$$

其中 $e^{-2\tau}$ 为大气双程透过率, τ 是光学厚度.

计算得到的Ka雷达路径衰减如图6a所示,可见进行云分析后,衰减量增加了0.5 dB左右. 计算星下点观测时,每个高度层上的路径衰减见图6b. 在云分析后,路径衰减量随高度明显增加.



a Ka 雷达 PIA 随扫描角度的变化



b 星下点观测时 Ka 雷达 PIA 随高度的变化

图6 Ka 雷达路径衰减变化图

Figure 6 Ka radar path attenuation change chart

经过定标处理后,得到Ka频段降雨雷达的观测结果如图7所示. 图7a是星下点的顺轨剖面,图7b是交轨剖面,回波最强的地方是地表,地杂波的影响高度约为200 m,色条中数值的单位是dBZ.

校飞时,携带观测实验仪器的飞机从东向西飞行,可以观察到降雨主要分布在航线的东南部. 从图7中可以清晰地看出降水的垂直与水平结构^[20].

6 总结

基于12通道地基微波辐射计观测亮温,利用试验地区近20年历史探空数据,发展了一套MWMOD微波辐射传输模式和神经网络的大气廓线反演算法,用于中国首次降水雷达校飞试验中微波辐射计观测亮温的反演计算,与GPS探空观测相比,反演的大气温度廓线在7 km以下误差均在

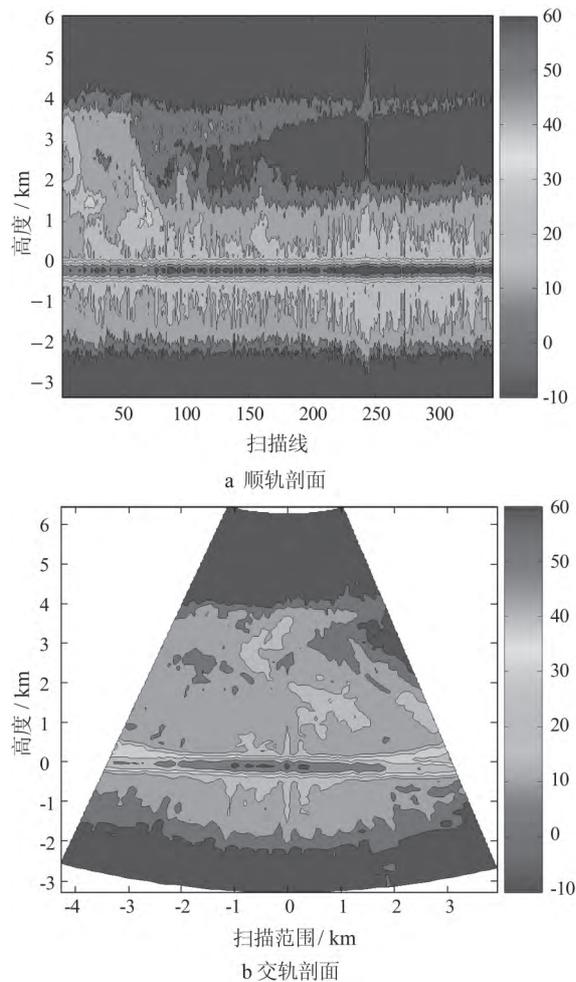


图7 Ka频段雷达测量结果(脉冲压缩模式)

Figure 7 Measurement results of Ka band radar (pulse compression mode)

3 K 以内,水汽密度廓线在 6 km 以下误差均在 3 g/m^2 以内;底层廓线的反演值与探空观测更接近。同时,利用微波辐射计实测亮温及 GPS 探空资料,通过分析云中液态水廓线,弥补探空数据,用于雷达衰减估计及降水雷达的算法研究中。

本文算法对于中国新型多通道微波辐射计的研制具有重要的参考价值,通过对 12 通道算法的扩展,用于 22 通道或 35 通道微波辐射计的反演工作;同时,针对相对湿度和液态水廓线反演精度差的现状,需要弥补模式分析液态水廓线精度上的不足,并结合红外温度计,定位云底高度和确定云厚等信息,以此提高两者的反演精度。

参考文献

- [1] Becker G, Autler S. Water vapor absorption of electromagnetic radiation in the centimeter wave-length range[J]. Phys Rev, 1946, 70(300).
- [2] Vleck V J. The absorption of microwaves by oxygen[J]. Phys Rev, 1947, 71(413): 413–424.
- [3] Westwater E R. An analysis of the correction of range errors due to atmospheric refraction by microwave radiometric techniques[R]. ESSA Technical Report IER 30-ITSA, 1969: 69.
- [4] Westwater E R. Ground-based determination of low altitude temperature profiles by microwaves[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(1): 15–28.
- [5] 赵柏林, 杜金林, 刘式达, 等. 微波遥感大气温度层结的原理和试验[J]. 大气科学, 1978, 2(4): 323–331.
- [6] 赵柏林, 尹宏, 李慧心, 等. 微波遥感大气湿度层结的研究[J]. 气象学报, 1981, 39(2): 217–225.
- [7] 吕达仁, 林海. 雷达和微波辐射计测雨特性比较及其联合应用[J]. 大气科学, 1980, 4(1): 30–39.
- [8] England M, Ferrare R, Melfi H, et al. Atmospheric water vapor measurements: comparison of microwave radiometry and lidar[J]. J Geophys Res, 1992, 97(D1): 899–916.
- [9] Han Y, Westwater E. Remote sensing of tropospheric water vapor and cloud liquid water by integrated ground-based sensors[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1995, 12: 1050–1059.
- [10] Solheim F, Godwin J, Westwater E, et al. Radiometric profiling of temperature, water vapor, and cloud liquid water using various inversion methods[J]. Radio Science, 1998, 33: 393–404.
- [11] Ware R, Solheim F, Carpenter R, et al. A multi-channel radiometric profiler of temperature, humidity and cloud liquid[J]. Radio Science, 2003, 38(4): 8079–8088.
- [12] Ferrare R, Turner D, Clayton M, et al. Evaluation of daytime measurements of aerosols and water vapor made by an operational Raman lidar over the Southern Great Plains[J]. J Geophys Res, 2006, 111: D05S08.1–D05S08.6.
- [13] Gultepe I, Kuhn T, Pavolnis M, et al. Ice fog in arctic during FRAM-ice fog project: aviation and nowcasting applications[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2014, 95(2): 211–226.
- [14] 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒, 等. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [15] 朱元竞, 胡成达, 甄进明, 等. 微波辐射计在人工影响天气研究中的应用[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1994, 30(5): 587–606.
- [16] 刘红燕, 王迎春, 王京丽, 等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 388–396.

- [17] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.
- [18] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008-2012年)[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [19] 卢建平, 黄建平, 郭学良, 等. 探测大气温湿廓线的35通道微波辐射计设计原理与特点[J]. 气象科技, 2014, 42(2): 193-197.
- [20] 商建, 郭杨, 吴琼, 等. 我国Ka频段降水测量雷达机载校飞试验结果[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 590-596.
- [21] Huang Jian-ping, Zhang Wu, Zuo Jin-qing, et al. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the loess plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(6): 1-16.
- [22] 刘亚亚, 毛节奏, 刘钧, 等. 地基微波辐射计遥感大气廓线的BP神经网络反演方法研究[J]. 高原气象, 2010, 29(6): 1514-1523.
- [23] 黄兴友, 张曦, 冷亮, 等. 基于Mono RTM模型的微波辐射计反演方法研究[J]. 气象科学, 2013, 33(2): 138-145.
- [24] Karstens U, Simmer C, Ruprecht E. Remote sensing of cloud liquid water[J]. Meteorol Atmos Phys, 1994, 54(1/4): 157-171.
- [25] 郭杨, 商建, 杨虎, 等. 星载降水雷达机载校飞试验: 地基多通道微波辐射计估算雷达路径积分衰减[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 887-891.
- [26] Bringi V N, Keenan T D, Chandrasekar V. Correcting C-band radar reflectivity and differential reflectivity data for rain attenuation: a self-consistent method with constraints[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2001, 39(9): 1906-1915.

(责任编辑: 张 勇)

(上接第192页)

- [17] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.
- [18] 郭其蕴. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析[J]. 地理学报, 1983, 38(3): 207-217.
- [19] 陈华琼. 中纬度海陆热力差异对东亚夏季环流及降水的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008.
- [20] 白莹莹, 张焱, 高阳华, 等. 四川盆地降水变化的区域差异[J]. 地理科学, 2011, 31(4): 478-484.
- [21] 蒋兴文, 李跃清, 李春, 等. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 476-484.
- [22] 郭渠, 孙卫国, 程炳岩, 等. 我国西北地区气候变化与北极涛动的交叉小波分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(6): 811-818.
- [23] 张存杰, 高学杰, 赵红岩. 全球变暖对西北秋季降水的影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 157-163.

(责任编辑: 张 勇)